

تأثیر نانولوله‌های کربنی بر استحکام فشاری و خمشی پانل‌های ساندویچی لانه‌زنبوری زمینه اپوکسی

لیدا نجمی^۱، سید مجتبی زبرد*^۲، کمال جانقربان^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۹، ش.ص: ۶۲-۴۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۰۲)

چکیده

نیازهای جوامع بشری و صنعت برای ساخت سازه‌هایی با وزن کم، استحکام و دوام بالا، موجب افزایش تقاضا برای مواد کامپوزیتی، از جمله ساختارهای ساندویچی شده است. در این میان پانل‌های ساندویچی در موقعیت‌هایی که نیاز به استحکام مکانیکی بالا، وزن کم، خاصیت عایق صدا و عایق حرارتی باشد، استفاده می‌شوند. در این تحقیق پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی با طرح لانه‌زنبوری، تقویت شده با نانولوله‌های کربنی با استفاده از قالب‌گیری سیلیکونی ساخته شدند. جهت تعیین نقش نانو لوله‌های کربنی روی رفتار فشاری و خمشی پانل‌های ساندویچی، درصد وزنی متفاوتی از این ماده (۰/۰۵، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۷۵) به زمینه اپوکسی اضافه شد. همچنین جهت تعیین نقش ضخامت دیواره هسته لانه‌زنبوری بر رفتار فشاری و خمشی پانل‌های ساندویچی، ضخامت‌های متفاوتی (۲/۵ و ۵ میلی‌متر) مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان دادند که استحکام فشاری پانل‌های لانه زنبوری با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی و همچنین ضخامت دیواره رابطه مستقیم دارد. استحکام فشاری نمونه‌های پانل ساندویچی با افزایش نانولوله‌های کربنی از ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۷۵ درصد وزنی، از ۴۲/۰۶ تا ۵۴/۳۲ مگاپاسکال افزایش یافت. استحکام فشاری نمونه‌های پانل ساندویچی با ضخامت دیواره لانه‌زنبوری ۵ میلی‌متر و تقویت شده با ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۷۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی در مقایسه با پانل‌های ساندویچی با ضخامت دیواره لانه‌زنبوری ۲/۵ میلی‌متر به ترتیب ۲/۳۸، ۲/۱۵ و ۲/۱۷ برابر شد. همچنین استحکام خمشی نمونه‌های پانل ساندویچی با ضخامت دیواره لانه زنبوری ۵ میلی‌متر و تقویت شده با ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۷۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی در مقایسه با پانل‌های ساندویچی با ضخامت دیواره‌ای ۲/۵ میلی‌متر به ترتیب ۲/۵، ۲/۱ و ۲/۲ برابر شد.

واژه‌های کلیدی: پانل‌های ساندویچی زمینه اپوکسی، نانولوله‌های کربنی، لانه زنبوری، استحکام فشاری، استحکام خمشی.

^۱ - کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی، بخش مهندسی مواد

^۲ - استاد، عضو هیئت علمی گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شیراز

^۳ - استاد، عضو هیئت علمی گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شیراز

* - نویسنده مسئول مقاله: mojtabazebard@shirazu.ac.ir

پیشگفتار

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف اعم از صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، هوا، فضا، برق و انتقال نیرو و غیره دارد. پانل‌های ساندویچی پلیمری به عنوان سازه‌های سبک، با استحکام بالا و عایق‌های حرارتی و صوتی مناسب استفاده می‌شوند. در نتیجه کاربرد آن‌ها به صنعت حمل و نقل از جمله صنایع خودرو، دریایی، هوایی و اخیراً ساخت و ساز گسترده شده است. استفاده از پانل‌های ساندویچی به عنوان عناصر ساختاری در پل‌های وسایل نقلیه، اسکله‌ها، بازسازی و یا جایگزینی پل‌های بتنی محدود نبوده و در سقف و همچنین به عنوان عناصر دیوارهای جدا کننده گسترش یافته است [۱-۳].

در حقیقت ساختارهای ساندویچی، نوع خاصی از مواد مرکب چند لایه می‌باشد. در این میان یک ساختار ساندویچی متشکل از دو پوسته نازک با استحکام بالا که به یک هسته ضخیم سبک وزن متصل شده‌است، می‌باشد. پوسته‌ها معمولاً سفت و سخت، درحالی‌که هسته نسبتاً ضعیف و انعطاف پذیر است؛ اما زمانی که در یک پانل ساندویچی ترکیب شوند، ایجاد یک ساختار سخت و بسیار سبک وزن خواهند نمود [۴].

رزین‌های اپوکسی در کاربردهای مختلفی از قبیل پوشش سطح، چسب، روکش‌دهی، ابزارسازی و کامپوزیت‌ها، استفاده می‌شوند. اپوکسی به طور گسترده در کامپوزیت‌ها استفاده شده و خواص مطلوبی مانند استحکام و سفتی مناسب، پایداری حرارتی و مقاومت در برابر محیط‌های شیمیایی ایجاد می‌کنند. به تازگی محققان کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی حاوی نانو ذرات را برای بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آن‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند. در این راستا خواص مناسب ایجاد شده ناشی از حضور نانوذرات اضافه شده به زمینه اپوکسی، سبب افزایش علاقه به استفاده از نانو ذرات شده است. در میان تقویت کنندگان نانویی مختلف به کار گرفته شده برای ساخت نانو کامپوزیت‌ها، به منظور ارتقا خواص فیزیکی و مکانیکی اپوکسی، نانو لوله‌های کربنی با توجه به خواص منحصر به فرد خود از قبیل سفتی و استحکام بالا، چگالی کم و هدایت حرارتی بالا، از اهمیت

زیادی برخوردار هستند [۵-۶].

با بررسی تحقیقات صورت گرفته مشاهده شده است که ویچمان و همکارانش [۷]، چقرمگی شکست و استحکام نانو کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که با افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، استحکام فشاری، مدول یانگ و کرنش شکست افزایش می‌یابند. کشاورز و همکارانش [۸]، استحکام فشاری پانل‌های ساندویچی پلی‌یورتان تقویت شده با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش درصد وزنی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم تا ۱ درصد وزنی، افزایش استحکام فشاری برابر با ۴۵٪ به دست می‌آید. می‌فنگ و همکاران [۹]، ساختار و خواص مکانیکی پانل‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری را بررسی نمودند. اسمیت و همکارانش [۱۰]، چقرمگی شکست سازه‌های پانل ساندویچی را مورد بررسی قرار دادند. آزمون پیکربندی برای پنج پانل ساندویچی مختلف تولید شده با تراکم هسته‌ای مختلف پلیمر PVC انجام شد. آن‌ها مشاهده نمودند که مقادیر چقرمگی شکست با توجه به تراکم هسته افزایش می‌یابد، در حالی که وابسته به مواد پوسته نمی‌باشد. مانالو و همکارانش [۱۱]، به بررسی رفتار خمشی ساندویچ‌های کامپوزیتی جدید ساخته شده از پوسته پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه‌ای و مواد هسته فنی اصلاح شده پرداختند. نتایج نشان داد که پرتوهای ساندویچی کامپوزیتی آزمون شده در موقعیت لبه‌ای^۱ در یک نیروی بالاتری با جابجایی کمتری در مقایسه با نمونه‌های آزمایش شده در موقعیت از پهنا^۲، با شکست مواجه شدند. دای و همکارانش [۱۲]، رفتار شکست پانل‌های ساندویچی را در آزمون خمش سه نقطه‌ای با استفاده از دو مواد هسته چوبی مختلف را بررسی کردند. نتایج نشان دادند، هنگامی که استحکام کششی پوسته بیش از حد شد، پانل‌ها دچار شکست شدند. هسته چوبی در جهت ضخامت قبل از شکست پوسته، به دلیل تنش کششی نسبتاً بالا در هسته، شکسته شدند.

^۱- Delamination
^۲-Flatwise

رزین اپوکسی و هادنر با نسبت ۱ به ۴ با هم مخلوط شده و خوب همزده می‌شود. مخلوط ایجاد شده در قالب مناسب ریخته می‌شود و به مدت ۶۰ دقیقه در خلاء با فشار ۸۰ Torr قرار داده می‌شود. پس از گذشت ۱۲۰ دقیقه فرایند پخت کامل شده و هسته لانه‌زنبوری از درون قالب خارج می‌شود. شکل ۱ هسته لانه‌زنبوری خالص را نشان می‌دهد. قالب‌گیری پوسته نیز مانند هسته انجام می‌شود، با این تفاوت که از قالب مناسب برای پوسته استفاده می‌شود.



شکل ۱- تصویر هسته لانه‌زنبوری تکفاز

اپوکسی تقویت شده با نانوتیوب کربن

جهت تقویت اپوکسی از نانولوله‌های کربنی چند دیواره^۱ عامل‌دار با قطر ۲۰-۳۰ نانومتر به عنوان تقویت‌کننده استفاده شد. هسته لانه‌زنبوری تقویت شده با انتخاب درصد‌های وزنی متفاوت از نانولوله‌های کربنی (۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵) ساخته شد. از آنجا که خواص نانو کامپوزیت‌های پلیمری تا حد زیادی به پراکندگی^۲ تقویت‌کننده‌های نانویی در زمینه و سازگاری پرکننده پلیمری و تعامل سطح بستگی دارد، توزیع مناسب نانو-لوله‌های کربنی در زمینه اپوکسی امری ضروری می‌باشد. در ادامه عملیات پراکنده‌سازی نانولوله‌های کربنی شرح داده می‌شود.

در ابتدا مقداری اپوکسی (متناسب با اندازه قالب) وزن شده و پس از آن ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ درصد

اغلب تحقیقات انجام شده، بر روی پانل‌های ساندویچی لانه‌زنبوری آلومینیومی صورت گرفته است. بنابراین با توجه به اینکه تاکنون اکثر پانل‌های ساندویچی، فلزی بوده، هدف از تحقیق حاضر، ساخت پانل‌های ساندویچی پلیمری با هسته لانه‌زنبوری اپوکسی می‌باشد، همچنین استفاده از اپوکسی سخت در پانل ساندویچی تحقیق حاضر، به عنوان پوسته پانل ساندویچی، ناشی از پایداری و مقاومت بسیار بالای آن و همچنین داشتن خواص مکانیکی بسیار عالی در مقایسه با مواد دیگر بسیار مهم می‌باشد.

در این تحقیق تلاش شده است که اپوکسی با درصد-های وزنی متفاوت از نانو تیوب کربن تقویت شود و اثر این نوع افزودنی و همچنین اثر ضخامت دیواره هسته لانه‌زنبوری بر استحکام فشاری اپوکسی ساخته شده، مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

به منظور ساخت نمونه‌های استاندارد از پانل‌های ساندویچی با و بدون حضور تقویت‌کننده، به صورت زیر عمل گردید.

نمونه‌های استاندارد با کمک قالب‌های پلکسی گلاس و سیلیکونی ساخته شدند. در این تحقیق پانل‌های ساندویچی با دو ضخامت دیواره‌ی لانه‌زنبوری ۵ و ۲/۵ میلی‌متر تولید شدند.

ساخت نمونه‌های استاندارد

اپوکسی خالص

در این تحقیق، از رزین اپوکسی برپایه بیسفنول A استفاده شد. این رزین دارای مقاومت شیمیایی بسیار عالی در محدوده وسیعی از محیط اسیدی، بازی و عوامل اکسید کننده در دمای اتاق و دماهای بالاتر می‌باشد. همچنین از هاردنر سیکلوالفاتیک‌آمین، با نسبت ۱ به ۴ استفاده شد.

برای قالب‌گیری هسته، ابتدا دیواره‌های قالب سیلیکونی به وسیله‌ی گیرس چرب می‌شود. سپس

¹- Multi wall

²-Dispersion



شکل ۳- تصویر نمونه پانل ساندویچی تکفاز

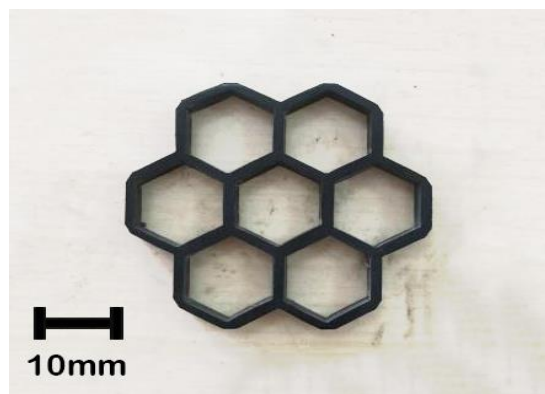
آزمون فشار

خواص فشاری نمونه‌های مذکور از جمله تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی و همچنین تاثیر ضخامت دیواره‌های لانه زنبوری بر استحکام فشاری نمونه‌های خالص و نمونه‌های تقویت شده با استفاده از استاندارد ASTM C-365 [۱۴]، مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمون فشار توسط دستگاه TORSEE ESC-20 ساخت کشور ژاپن با ظرفیت ۲۰ Ton و سرعت ۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه صورت گرفت. نمونه‌ها با قطر ۶۰ و ارتفاع ۱۳ میلی‌متر تهیه شدند و مورد ارزیابی فشاری قرار گرفتند. نمونه‌های پانل ساندویچی به دو شکل پانل-های ساندویچی با ضخامت دیواره ۵ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۲/۵ میلی‌متر که هر کدام از ضخامت‌ها شامل ۴ نمونه با درصد‌های مختلف نانولوله کربنی می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفتند.

آزمون خمشی سه نقطه‌ای

آزمون خمشی سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های پانل ساندویچی به دو شکل پانل‌های ساندویچی با ضخامت دیواره ۵ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۲/۵ میلی‌متر که هر کدام شامل ۴ نمونه با درصد‌های مختلف نانولوله‌های کربنی می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفتند. این آزمون توسط دستگاه TORSEE ESC-20 ساخت کشور ژاپن با ظرفیت ۲۰ tf و با سرعت ۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه و با استفاده از استاندارد ASTM D-790 [۱۵]، انجام پذیرفت. نمونه با سطح مقطع مستطیل شکل و در حالت

وزنی از وزن اپوکسی، نانولوله کربنی به دقت وزن می‌شود. ابتدا مقداری استون^۱ به نانولوله کربنی اضافه می‌شود و در دستگاه آلتراسونیک پروبی با توان ۷۰ وات و سیکل ۱۰ ثانیه به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده می‌شود. این کار برای از بین بردن حالت کلوخه‌ای نانوتیوب‌ها می‌باشد. پس از آن، این سوسپانسیون^۲ به اپوکسی اضافه شده و این ترکیب توسط همزن مغناطیسی به مدت ۱ ساعت و با دمای ۴۰ °C همزده می‌شود تا اینکه استون کاملاً از محلول خارج شود. در انتها هاردنر به محلول یکنواخت از اپوکسی و نانوتیوب کربن اضافه می‌شود و خوب همزده می‌شود [۱۳]. محلول آماده شده در قالب سیلیکونی که از قبل چرب شده است ریخته می‌شود. سپس قالب در دستگاه خلاء با فشار ۸۰ Torr به مدت ۶۰ دقیقه قرار داده می‌شود، تا حباب‌ها از درون قالب خارج شوند. پس از گذشت ۱۲۰ دقیقه پخت کامل انجام شده و نمونه از درون قالب خارج می‌شود. شکل ۲ هسته لانه زنبوری تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- تصویر هسته لانه زنبوری تقویت شده

پانل ساندویچی

هسته پانل ساندویچی که به شکل لانه زنبوری است به پوسته که یک صفحه نازک از جنس اپوکسی به وسیله چسب Super Glue متصل شد. شکل ۳ پانل ساندویچی خالص را نشان می‌دهد.

^۱-CH₃COCH₃

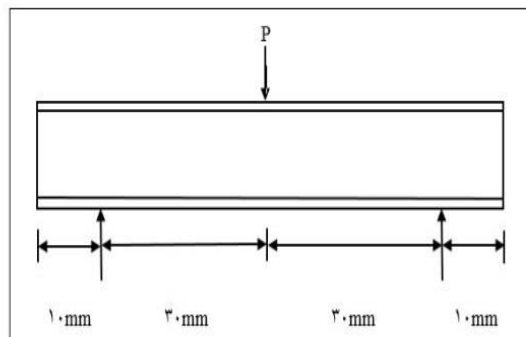
^۲-Suspension

می‌توان به استحکام فشاری کل پانل ساندویچی نسبت داد. چنانچه در شکل ۷ مشاهده می‌شود، استحکام فشاری پانل‌های ساندویچی لانه‌زنبوری با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی نسبت به پانل‌های ساندویچی لانه‌زنبوری تکفاز افزایش می‌یابد. بیش‌ترین درصد افزایش استحکام فشاری در پانل‌های ساندویچی لانه‌زنبوری تقویت شده با ۰/۰۷۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به ترتیب ۳۸/۵٪ و ۳۶/۱۶٪ برای نمونه‌های پانل ساندویچی با ضخامت دیواره ۵ و ۲/۵ میلی‌متر نسبت به نمونه خالص مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که ضمن بالا بودن نسبت استحکام فشاری به وزن، با افزایش درصد وزنی نانولوله‌های کربنی نسبت استحکام به وزن افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش استحکام، پراکندگی متفاوت نانولوله‌ها می‌باشد که جهت گیری متفاوتی نسبت به نیروی اعمالی دارند [۱۷]. از سوی دیگر، محققان دلیل افزایش استحکام فشاری را به پیوند سطحی ایجاد شده و اتصال چسبندگی قوی، میان نانولوله‌های کربنی و گروه عاملی زمینه اپوکسی نسبت داده‌اند [۱۸].

با توجه به شکل ۹ با افزایش ضخامت دیواره هسته لانه‌زنبوری، استحکام فشاری پانل‌های ساندویچی افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که در پانل ساندویچی خالص با ضخامت دیواره‌ای ۵ میلی‌متر در مقایسه با پانل ساندویچی خالص با ضخامت دیواره‌ای ۲/۵ میلی‌متر، درصد افزایش استحکام فشاری ۱۳۸/۲٪ مشاهده می‌شود. با دو برابر شدن ضخامت دیواره‌ها استحکام فشاری، افزایشی بیش از دوبرابر داشته است، این موضوع به این علت می‌باشد که با افزایش ضخامت دیواره‌ها، نسبت ضخامت به ارتفاع بیش‌تر شده پس مقاومت به خم شدگی افزایش می‌یابد. در نتیجه افزایش استحکام بیش از دو برابر نسبت به ضخامت ۲/۵ مشاهده می‌شود.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی نانولوله‌های کربنی در پانل‌های ساندویچی کرنش در ماکزیمم تنش فشاری کاهش می‌یابد. کم‌ترین کرنش شکست را می‌توان در نمونه‌های تقویت شده با ۰/۰۷۵ درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی ناشی از توزیع مناسب در زمینه‌ی اپوکسی مشاهده نمود.

مد خمشی سه نقطه‌ای با تنظیمات مطابق شکل ۴ بارگذاری شدند.

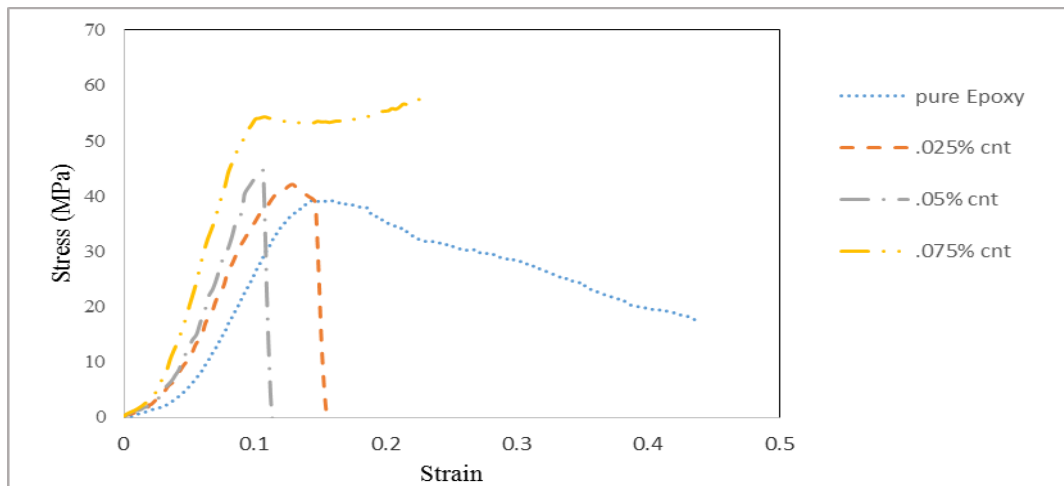


شکل ۴- هندسه نمونه پانل ساندویچی برای آزمون خمش

قابل ذکر است که با توجه به سطح موثر در واحد سطح و همچنین تعداد شش وجهی‌ها در سطح مورد نظر، این دو ضخامت در نظر گرفته شدند.

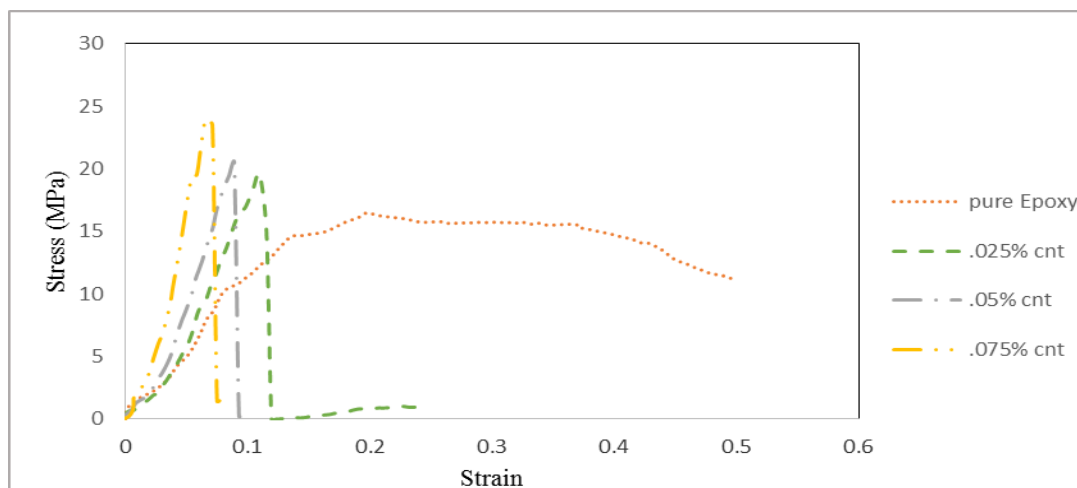
نتایج و بحث

داده‌های حاصل از آزمون فشار، به صورت نمودار تنش-کرنش گزارش می‌شوند. نمودار تنش-کرنش مهندسی حاصل از آزمون فشار پانل‌های ساندویچی لانه‌زنبوری اپوکسی با ضخامت‌های ۵ و ۲/۵ میلی‌متر، تقویت شده با درصد‌های وزنی مختلف نانولوله‌های کربنی در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، منحنی‌های فوق از سه مرحله تغییر شکل شامل: (۱) منطقه الاستیک (۲) منطقه پلاتو (۳) منطقه چگالش تشکیل شده است. منطقه الاستیک، مرتبط با کشش دیواره‌های سلولی و یا خم شدن الاستیک می‌باشد. در ادامه توسط کمانش نمونه‌های تحت فشار، فروپاشی و تخریب سلول‌ها آغاز شده و با ادامه تخریب سلول‌ها، منطقه پلاتو آغاز می‌شود. مرحله نهایی منطقه چگالش می‌باشد که مربوط به فروپاشی کامل سلول‌ها و برخورد دیواره‌های سلولی مخالف است [۱۶]. استحکام فشاری در کرنش‌های کم به استحکام فشاری اپوکسی اختصاص دارد و در کرنش‌های بالاتر، استحکام فشاری حاصل را



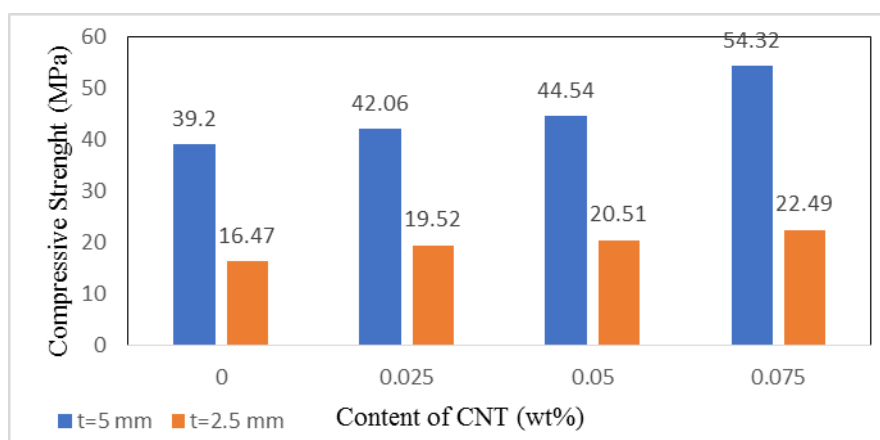
شکل ۵- نمودار تنش- کرنش آزمون فشار برای پانل‌های ساندویچی تکفاز و تقویت شده با نانولوله‌های کربنی با ضخامت ۵

میلی‌متر



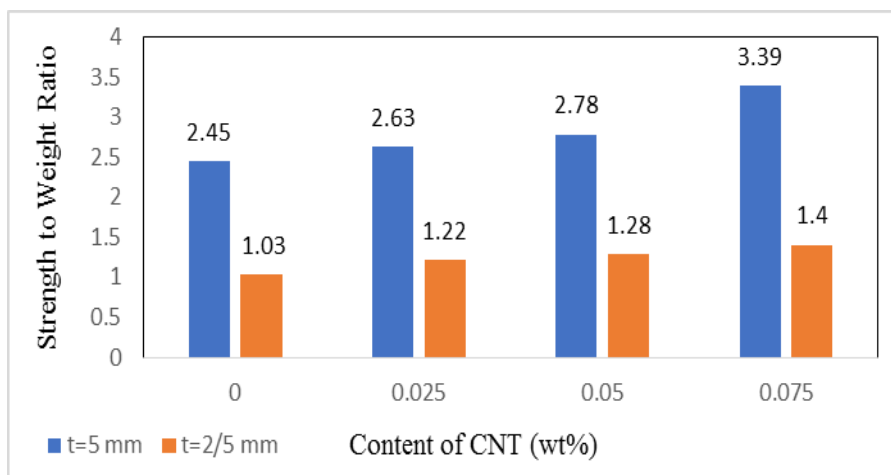
شکل ۶- نمودار تنش- کرنش آزمون فشار برای پانل‌های ساندویچی تکفاز و تقویت شده با نانولوله‌های کربنی با ضخامت

۲/۵ میلی‌متر

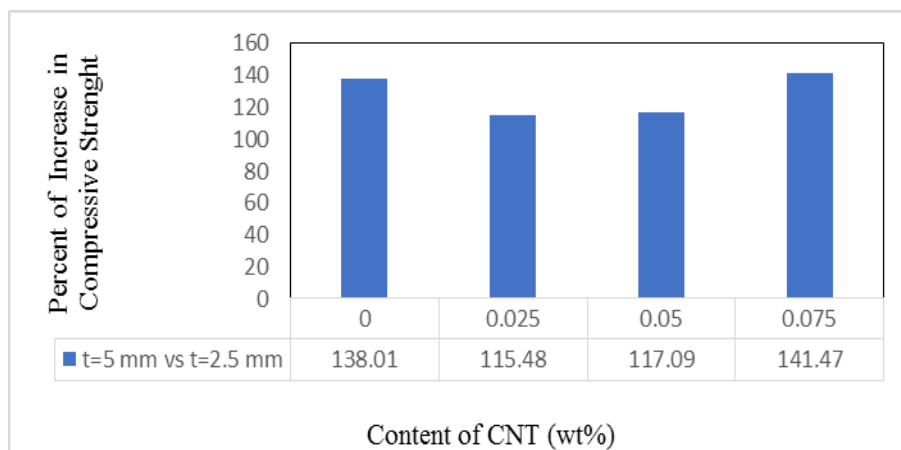


شکل ۷- مقایسه استحکام فشاری پانل‌های ساندویچی با ضخامت دیواره ۵ و ۲/۵ میلی‌متر با درصد‌های وزنی مختلف از

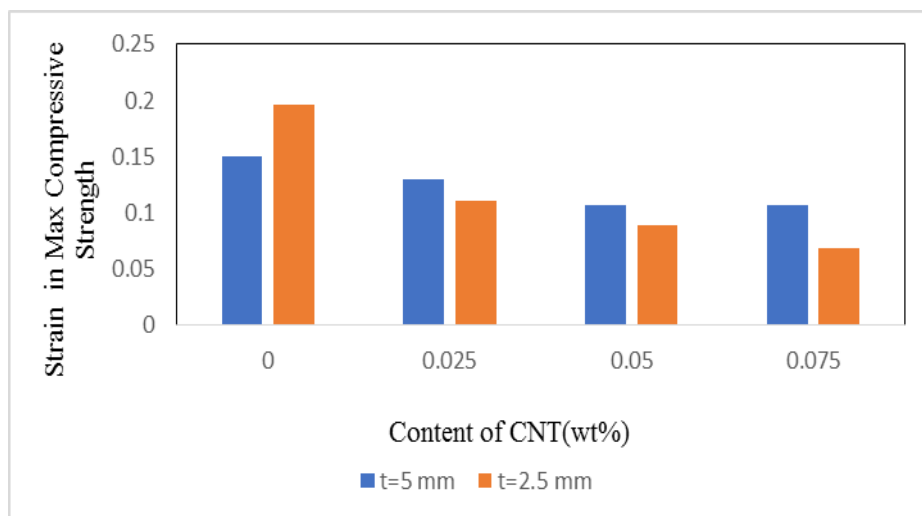
نانولوله‌های کربنی



شکل ۸- مقایسه‌ی نسبت استحکام به وزن پانل‌های ساندویچی با ضخامت دیواره ۵ و ۲/۵ میلی‌متر با درصدهای وزنی مختلف از نانولوله‌های کربنی



شکل ۹- درصد افزایش استحکام فشاری پانل‌های ساندویچی با ضخامت دیواره ۵ و ۲/۵ میلی‌متر با درصدهای وزنی مختلف از نانولوله‌های کربنی نسبت به نمونه‌ی تکفاز



شکل ۱۰- مقایسه کرنش شکست پانل‌های ساندویچی در درصدهای وزنی مختلف نانولوله‌های کربنی

چنانچه در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، برای هر دو ضخامت دیواره‌ای ۵ و ۲/۵ میلی‌متر استحکام خمشی پانل‌های ساندویچی لانه‌زنبوری با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی نسبت به نمونه خالص افزایش می‌یابد. بیش‌ترین درصد افزایش استحکام خمشی مربوط به پانل‌های ساندویچی لانه زنبوری تقویت شده با ۰/۰۷۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی می‌باشد. همچنین در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که نسبت استحکام خمشی به وزن برای هر دو ضخامت دیواره‌ای افزایش می‌یابد.

به منظور بررسی اثر ضخامت، آزمون خمش بر پانل‌های ساندویچی با ضخامت دیواره لانه زنبوری ۲/۵ و ۵ میلی‌متر انجام گردید. با توجه به جداول ۱ و ۲ با افزایش ضخامت، نیروی خمشی ناشی از افزایش ضخامت دیواره لانه‌زنبوری، افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که در پانل ساندویچی با ضخامت دیواره‌ای ۵ میلی‌متر در مقایسه با پانل ساندویچی با ضخامت دیواره‌ای ۲/۵ میلی‌متر، افزایش نیروی خمشی ۴۰۰٪، ۲۰۰٪، ۱۶۶٪ و ۱۷۵٪ به ترتیب برای پانل‌های ساندویچی خالص و تقویت شده با ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۷۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی مشاهده می‌شود.

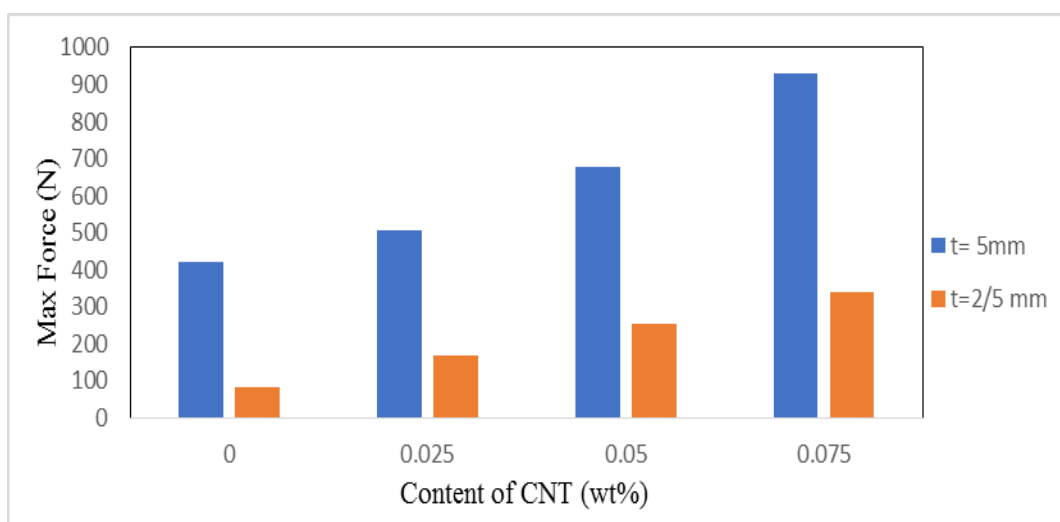
نتایج حاصل از آزمون خمش سه نقطه‌ای، نمودار نیرو-جابجایی می‌باشد. داده‌های حاصل از این آزمون در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. با توجه به جداول ۱ و ۲ و شکل ۱۱ می‌توان مشاهده نمود که نیروی خمشی پانل‌های ساندویچی با افزودن نانولوله‌های کربنی تا ۰/۰۷۵ درصد وزنی در مقایسه با پانل‌های ساندویچی خالص افزایش می‌یابد. با افزایش درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، افزایش نیروی خمشی ۲۰، ۶۰ و ۱۲۰ درصدی به ترتیب برای پانل‌های ساندویچی تقویت شده با ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۷۵ درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی نسبت به پانل‌های ساندویچی خالص با ضخامت ۵ میلی‌متر مشاهده می‌شود. به همین ترتیب افزایش نیروی خمشی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درصدی برای پانل‌های ساندویچی تقویت شده با ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۷۵ درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی نسبت به پانل‌های ساندویچی خالص با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر مشاهده می‌شود. با افزایش نانولوله‌های کربنی، بار اعمال شده به زمینه اپوکسی به نانولوله‌های کربنی انتقال داده می‌شود. بنابراین علت افزایش نیروی خمشی، پراکندگی خوب نانولوله‌ها در زمینه پلیمری، در نتیجه خاصیت خیزندگی و خاصیت تا شوندگی نانولوله‌ها می‌باشد.

جدول ۱- داده‌های حاصل از آزمون خمش پانل‌های ساندویچی با ضخامت دیواره لانه زنبوری ۵ میلی‌متر

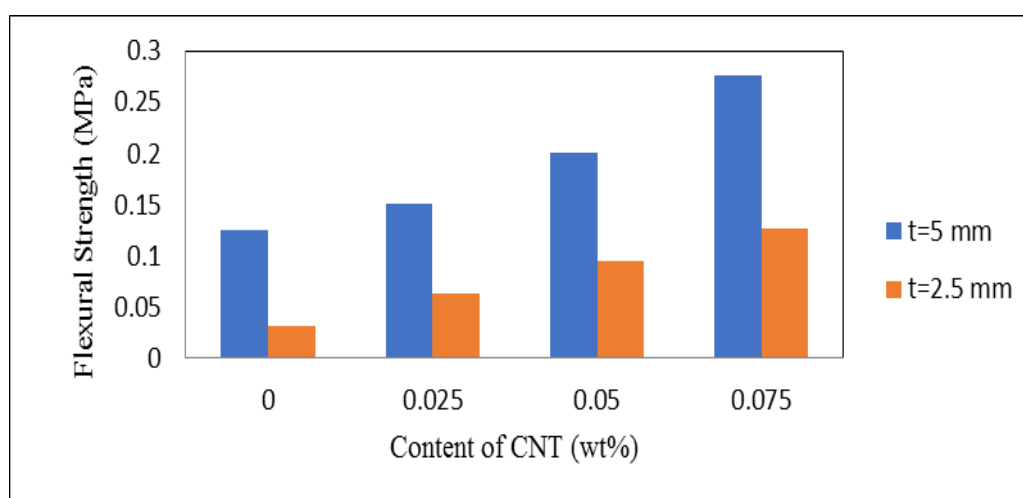
| پانل‌های ساندویچی t=۵mm | طول دهانه (mm) | عرض (mm) | حداکثر نیرو (N) | جابجایی در حداکثر نیرو (mm) |
|----------------------------|-------------------|-------------|--------------------|--------------------------------|
| pure | ۶۰ | ۸ | ۴۲۲/۶ | ۰/۱۰۳ |
| ۰/۰۲۵٪ cnt | ۶۰ | ۸ | ۵۰۷/۱ | ۰/۱۹۹ |
| ۰/۰۵٪ cnt | ۶۰ | ۸ | ۶۷۶/۲ | ۰/۵۲ |
| ۰/۰۷۵٪ cnt | ۶۰ | ۸ | ۹۲۹/۸ | ۱/۲۹ |

جدول ۲- داده‌های حاصل از آزمون خمش پانل‌های ساندویچی با ضخامت دیواره لانه‌زنبوری ۲/۵ میلی‌متر

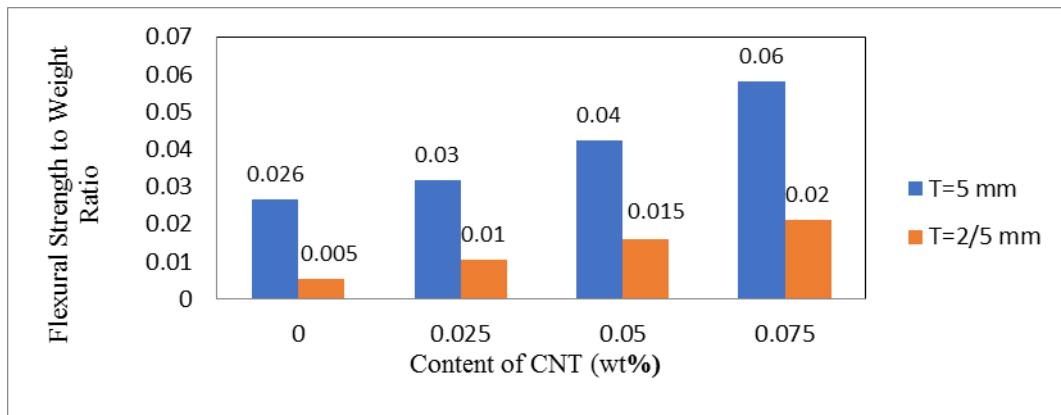
| پانل‌های ساندویچی $t=2/5\text{mm}$ | طول دهانه (mm) | عرض (mm) | حداکثر نیرو (N) | جابه‌جایی در حداکثر نیرو (mm) |
|---------------------------------------|-------------------|-------------|--------------------|----------------------------------|
| pure | ۶۰ | ۸ | ۸۴ | ۰/۰۵۲ |
| ۰/۰۲۵ % CNT | ۶۰ | ۸ | ۱۶۹ | ۰/۱۵۸ |
| ۰/۰۵% CNT | ۶۰ | ۸ | ۲۵۳/۵ | ۰/۱۶۹ |
| ۰/۰۷۵% CNT | ۶۰ | ۸ | ۳۳۸/۱ | ۱/۱۷ |



شکل ۱۱- تاثیر نانولوله‌های کربنی بر نیروی خمشی پانل‌های ساندویچی با ضخامت‌های ۲/۵ و ۵ میلی‌متر



شکل ۱۲- مقایسه‌ی استحکام خمشی پانل‌های ساندویچی با ضخامت دیواره ۲/۵ و ۵ میلی‌متر با درصد‌های وزنی مختلف از نانولوله‌های کربنی



شکل ۱۳- مقایسه‌ی نسبت استحکام خمشی به وزن پانل‌های ساندویچی با ضخامت دیواره ۵ و ۲/۵ میلی‌متر با درصد‌های وزنی مختلف از نانولوله‌های کربنی

ارزیابی میکروسکوپی

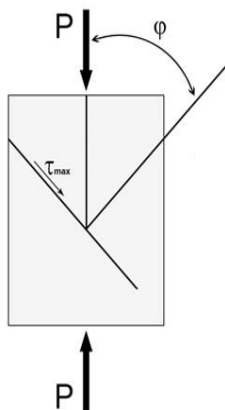
می‌باشد که هنگامی که زنجیره‌های پلیمری در جهت ۴۵ درجه نسبت به نیروی عمودی حرکت می‌کنند، نانولوله‌ها همانند مانع عمل کرده و سبب منحرف کردن این زنجیره‌ها می‌شوند و گاهی به صورت ایجاد کننده تنش برشی عمل می‌کنند. پس هنگامی که درصد نانولوله‌های کربنی بیش‌تر می‌شود، این برخوردها و انحراف مسیرها افزایش می‌یابد [۲۱].

در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های پانل ساندویچی خالص و تقویت شده با نانولوله‌های کربنی بعد از آزمون خمش سه نقطه‌ای مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۱۸ مشاهده می‌شود که نمونه پانل ساندویچی خالص بعد از آزمون خمش سه نقطه‌ای خطوط شکست ایجاد شده زاویه ۴۵ درجه با جهت اعمال نیرو می‌سازند. شکل ۱۹ نمونه پانل ساندویچی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی بعد از آزمون خمش سه نقطه‌ای را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمونه‌های تقویت شده خطوط شکست بیشتری روی سطح شکست مشاهده می‌شود.

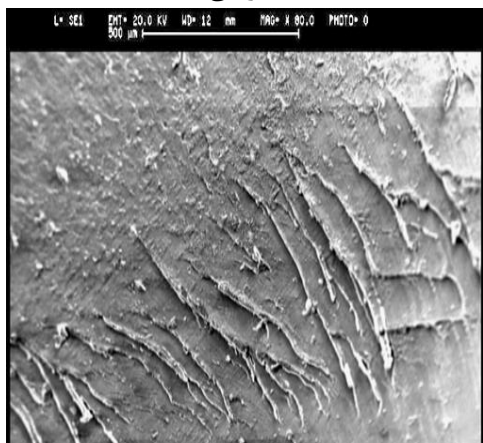
شکل ۱۴ و ۱۶ به ترتیب تصویر میکروسکوپی از ساختار پانل ساندویچی خالص قبل از آزمون فشار و بعد از آزمون فشار را نشان می‌دهند، مشاهده می‌شود که نمونه بعد از آزمون فشار در مقایسه با نمونه قبل از آزمون چین‌خوردگی‌هایی در سطح آن ایجاد شده است. این چین‌خوردگی‌ها با جهت اعمال نیرو که به صورت عمود به سطح نمونه وارد می‌شود، زاویه φ را می‌سازند که در شکل ۱۵ تصویر شماتیک از جهت اعمال نیرو و جهت لغزش مشاهده می‌شود [۱۹].

ماکزیمم تنش برشی در زاویه $\varphi=45^\circ$ اتفاق می‌افتد [۲۰]. همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، خطوط شکست در جهت تقریباً ۴۵ درجه نسبت به نیروی اعمالی می‌باشد و این بدان معناست که حداقل تنش برشی لازم برای شکست ایجاد شده و شکست صورت گرفته است.

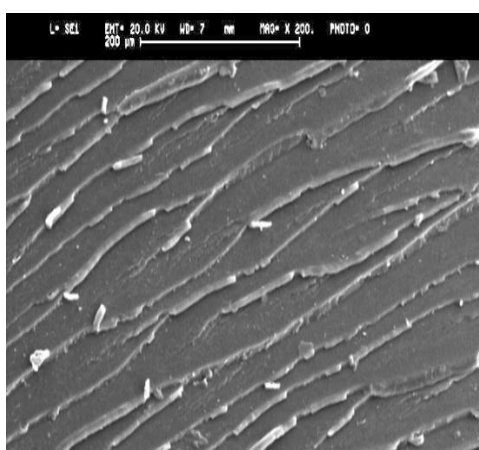
مقدار تنش برشی بحرانی با افزودن نانولوله‌های کربنی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، چین‌خوردگی‌های بیش‌تر که دارای تغییر مسیر جزئی می‌باشند، در سطح شکست ایجاد شده است. ایجاد چین‌خوردگی‌های بیش‌تر و تغییر مسیر به این علت



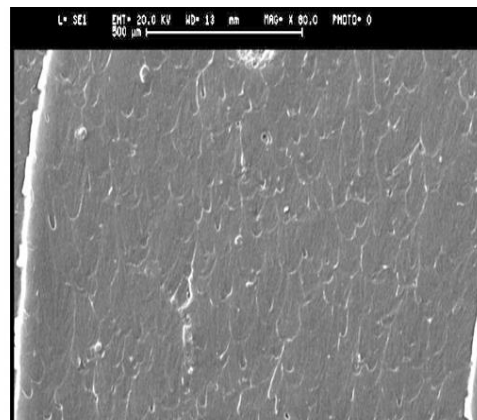
شکل ۱۵- تصویر شماتیک از زاویه ماکزیمم تنش برشی



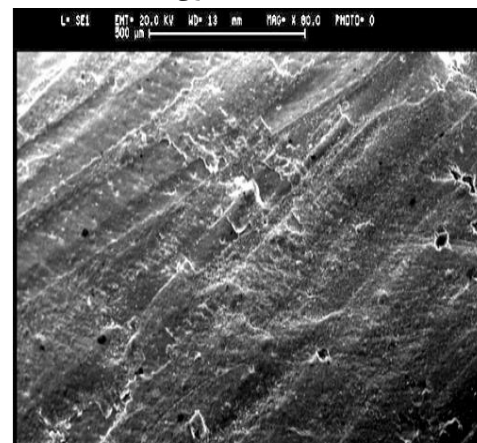
شکل ۱۶- تصویر SEM پانل ساندویچی لانه زنبوری خالص بعد از آزمون فشار



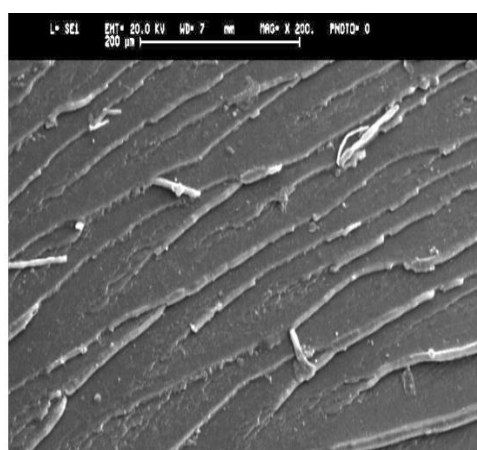
شکل ۱۹- تصویر SEM پانل ساندویچی لانه زنبوری تقویت شده با نانولوله‌های کربنی، بعد از آزمون خمش سه نقطه‌ای



شکل ۱۴- تصویر SEM پانل ساندویچی لانه زنبوری خالص قبل از آزمون فشار



شکل ۱۷- تصویر SEM پانل ساندویچی لانه زنبوری تقویت شده با نانولوله‌های کربنی، بعد از آزمون فشار



شکل ۱۸- تصویر SEM پانل ساندویچی لانه زنبوری خالص بعد از آزمون خمش سه نقطه‌ای

نتیجه گیری

برابر شده است که این نتایج بسیار قابل ملاحظه می‌باشند.

کرنش در ماکزیمم تنش با افزایش مقدار نانولوله‌های کربنی کاهش یافت.

نتایج حاصل از آزمون خمشی پانل‌های ساندویچی نشان می‌دهد که نیروی خمشی با افزودن نانولوله‌های کربنی، در مقایسه با پانل‌های ساندویچی خالص ناشی از توزیع مناسب نانولوله‌های کربنی افزایش می‌یابد. با افزایش هر چه بیش‌تر درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، بواسطه آگلومره شدن نانولوله‌ها، کاهش نیروی خمشی در نمونه‌های تقویت شده با مقادیر بیش‌تر از ۰/۰۷۵ درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی مشاهده شد. با افزایش ضخامت دیواره هسته لانه‌زنبوری استحکام خمشی افزایش یافت، به طوری که بیش‌ترین استحکام خمشی در نمونه تقویت شده با ۰/۰۷۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی با ضخامت دیواره‌ای ۵ میلی‌متر مشاهده شد.

با افزایش مقدار نانولوله‌های کربنی خطوط بیش‌تری روی سطح شکست ایجاد شد.

آزمون فشار برای نمونه‌های پانل‌های ساندویچی لانه زنبوری اپوکسی تقویت شده با درصدهای وزنی مختلف نانولوله‌های کربنی انجام گردید. مشاهده شد که استحکام فشاری با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی تا ۰/۰۷۵ درصد وزنی، افزایش می‌یابد. افزایش استحکام فشاری برابر با ۳۸/۵۴٪ برای پانل‌های ساندویچی تقویت شده با ۰/۰۷۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی بدست آمد.

آزمون فشار برای نمونه‌های پانل ساندویچی با ضخامت دیواره هسته لانه زنبوری ۵ و ۲/۵ میلی‌متر تقویت شده با درصدهای وزنی مختلف نانولوله‌های کربنی انجام گردید. با افزایش ضخامت دیواره هسته لانه زنبوری، استحکام فشاری و نسبت استحکام به وزن پانل ساندویچی افزایش می‌یابد. استحکام فشاری برای نمونه‌های پانل ساندویچی تک‌فاز با ضخامت ۵ میلی‌متر و تقویت شده با ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۷۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی در مقایسه با پانل‌های ساندویچی با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر به ترتیب ۲/۳۸، ۲/۱۵ و ۲/۱۷

Reference:

- 1- Tuwair H., Hopkins M., Volz J., ElGawady M., Mohamed M., Chandrashekhara K., Birman V., (2015), "Evaluation panels with various polyurethane foam-cores and ribs", Composites Part B, PP. 256-276.
- 2- Allen H.G. (1969), "Analysis and design of structural panels", Oxford, New York, Pergamon Press.
- 3- Leite, M., Freitas, M., Silva, A. (2004), "Elastic behavior of sandwich beams-part 1: experimental study" in 9th Portuguese

Conference on Fracture, Setubal, Portugal, pp. 18-20.

- 4- Rocca S., Nanni A., (2005), "Mechanical characterization of sandwich structure comprised of glass fiber reinforced core" Composites in Construction part 2,3th International Conference Lyon, France, pp. 11-13.

۵- سید مجتبی زبرجد/ محمد هادی مقیم (۱۳۹۴)، "مقدمه ای بر نانو کامپوزیت های پلیمری" موسسه چاپ دانشگاه فردوسی مشهد.

- ۶- سید مجتبی زبرجد / فاطمه احمد پور. (۱۳۹۱). "مقدمه ای بر نانولوله‌های کربنی". موسسه چاپ دانشگاه فردوسی مشهد.
- 7- M.H.G. Wichmann., F.H. Gojny., U. Kopke., B. Fiedler., K. Schulte. (2004), "Carbon nanotube-reinforced epoxy composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content" *Composites Science and Technology* 64, 2363–2371.
- 8- M. Keshavarz., M. Zebarjad., H. Danesh-Manesh. (2015), "Manufacturing of polyurethane sandwich panel reinforced with TiO_2 nanoparticles and investigation its properties", M.Sc. Thesis in Materials Science and Engineering.
- 9- Meifeng He, Wenbin Hu. (2008) "A study on composite honeycomb sandwich panel structure", *Materials and Design*, Vol 29, PP 709-713.
- 10- Smith S., Shivakumar K. (2001), "Modified Mode-I cracked sandwich beam (CSB) fracture test". *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, PP. 1221-1232.
- 11- Manalo A., Aravinthan T., Karunasena W., Islam M., (2010), "Flexural behavior of structural fiber composite sandwich beams in flatwise and edgewise positions". *Composite Structural*, Vol. 92, PP. 984-995.
- 12- Dai J., Hahn H. (2003), "Flexural behavior of sandwich beams fabricated by vacuum-assisted resin transfer modeling", *Composite Structural*, Vol .61, PP. 247-253.
- 13- S. A. Hashemi, S. M. Mousavi. (2016), "Effect of bubble-based degradation on the physical properties of single wall carbon nanotube/epoxy Resin composite and new approach in bubbles reduction", *Composites: Part A* 90, 457–469.
- 14- ASTM C-365, "Standard test methods for flatwise compressive properties of sandwich cores", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol.03.01, American Society for Testing and Materials.
- 15- ASTM D-790 (2002), "Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials", *Annual Book of ASTM Standards* Vol. 08.01, American Society for Testing and Materials.
- 16- Zhang X., Davis H., Macosko C. (1999), "A new cell opening mechanism in flexible polyurethane foam", *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 35, Minneapolis.
- 17- R. Saito. (1998). "Physical Properties of Carbon Nanotubes", Imperial College Press ISBN 1-86094-093-5.
- 18- Isaac M., Jeong min CH., Brian T. (2013), "Werner characterization and modeling of stain-rate-depend behavior of polymeric foams", *Composites: part A*, Vol. 45, pp. 70 -78.
- 19- Chalal S., Haddadine N., Bouslah N., Souilah S., Benaboura A., Barille R. (2014), "Preparation characterization and thermal behavior of carbopol- TiO_2 nanaocomposites", *Open Journal of Organic Polymer Materials*, Vol. 4, PP. 55-64.

20- G. E. Dieter, “Mechanical Metallurgy”, McGraw-Hill book, New York, 1998.

21- Kuan. Y., Shiuh. H. (2017), “Dynamic analysis of carbon nanotube-reinforced nanocomposites”, Journal Appl Biomater Funct Mater. Vol 15, PP 13-18.